

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420221

研究課題名(和文)制動容量型高性能分圧器の開発

研究課題名(英文)Development of High Performance Damped Capacitive Divider

研究代表者

里 周二(SATO, Shuji)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10215759

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：筆者らは、高性能制動容量型雷インパルス電圧波形測定用分圧器を開発し、その性能を報告してきた。今回、従来の制動容量型分圧器形状とは全く異なる高圧部形状を有する構造の分圧器を考え、試作器としてその性能を評価したところ、極めて高性能であることを確認した。新しい構造及び単位ステップ応答から数値コンボリューションによって評価された標準雷インパルス電圧応答特性は0.2%以内に収まることを確認した。

新しい高圧部ではこの要素が時計回りと反時計回りに高圧部円筒絶縁体を周回し、稼働時に要素中を流れる電流が周囲に磁束が発生しても、上下の要素間で互いに発生を打ち消すように働く構造になっている。

研究成果の概要(英文)：We have developed a high performance damped capacitive voltage divider and evaluated its response after measuring unit step response. The developed voltage divider significantly differ from the conventional same type divider in high voltage arm. Whilst 70kV class ceramic capacitors are piled up in the conventional type, newly developed divider's main column consists of strings of 4kV capacitors. The strings are wound spirally in opposite direction so that magnetic field generated by each string cancels each other. Divider's standard lightning impulse responses were evaluated by numerical convolution using measured unit step response. It was confirmed that T1-error was around 0.2% which is the level almost impossible to measure by today's technology.

研究分野：高電圧工学

キーワード：雷インパルス電圧 高電圧分圧器 制動容量型分圧器 Ayrton-Perry Winding

### 1. 研究開始当初の背景

制動容量型分圧器は半世紀も前に開発され、抵抗型分圧器が伝導電流による逆起電力を分圧するのに対し、変位電流による逆起電力を分圧するので、大きな電流が流れず本体が発熱することがない。

(1) このため 1MV を越える高性能高電圧分圧器の作成が可能である。

(2) しかし、高耐圧キャパシタは高価な上、周波数特性に問題があるため国家標準級の分圧器は抵抗型分圧器で製作されていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、大規模直列接続キャパシタという考えを導入して、従来は 1 個が 75kV 耐圧のキャパシタを 4 段積み上げて 300kV の直列キャパシタを構成していたが、周波数特性に優れたポリプロピレン型 4kV 耐圧のキャパシタを 75 個繋いで 300kV 耐圧の大規模直列接続キャパシタを組み上げるというものである。

### 3. 研究の方法

(1) 先ず、高性能分圧器の波形を評価する波形解析ソフトウェアを製作する。このソフトウェアは Windows タイプで、その性能は IEC 61083-2:2013 の要求する性能を満足することを目的とする。

(2) 大規模直列接続キャパシタを例えば 75 個直列に繋ぐと耐圧は満足するものの、非常に長くなり、絶縁柱に巻き付けると残留インダクタンス増え、分圧器としての性能劣化の原因となる。研究では 2 列の直列キャパシタを絶縁柱回りに互いに逆螺旋状に巻くことにより、直列キャパシタを流れる電流の作る磁界が互いに相殺する構造とする。この構造により、残留インダクタンスの小さな高性能分圧器の製作が可能となる。

(3) 300kV 耐圧の分圧器を小型にするため、分圧器メインカラムをアクリル容器の中に収納し大気圧 SF6 を封入する。この構造により、単純比較で空気の 3 倍の絶縁耐圧を実現することができる。

### 4. 研究成果

(1) 概要 筆者らは近年、高性能制動容量型雷インパルス電圧波形測定用分圧器を開発し、その性能を報告してきた(1)。今回、従来の制動容量型分圧器形状とは全く異なる高圧部形状を有する構造の分圧器を考え、試作器としてその性能を評価したところ、極めて高性能であることを確認した。

【直列接続された抵抗とキャパシタ】を一つの要素と定義したとき、新しい高圧部ではこの要素が時計回りと反時計回りに高圧部円筒絶縁体を周回し、稼働時に要素中を流れる電流が周囲に磁束が発生しても、上下の要素間で互いに発生を打ち消すように働く構造になっている。

新しい構造及び単位ステップ応答から数値コ

ンボリューションによって評価された標準雷インパルス電圧応答特性は 0.2% 以内に収まることを確認した。

(2) 制動容量型分圧器分圧器の構造 図 1 は従来型の制動容量型分圧器の構造を示したものである(2)。図には示さなかったが、抵抗分圧器の構造と比較すると高圧部構造に大きな違いのあることが分かる。即ち、抵抗分圧器の高圧部は金属巻線抵抗を無誘導巻き (Ayrton-Perry 巻きや Meander 巻き) にした抵抗素子を測定電圧に応じて何本か直列接続する。この作業により高圧部の残留インダクタンスは激減する。これに対し、制動容量型分圧器ではキャパシタを何段も縦続接続して所定の耐圧を実現する必要がある。制動部に無誘導抵抗を使用し、残留インダクタンスを軽減しても、キャパシタの部分には (並列接続以外) 何ら対策が施されていない。

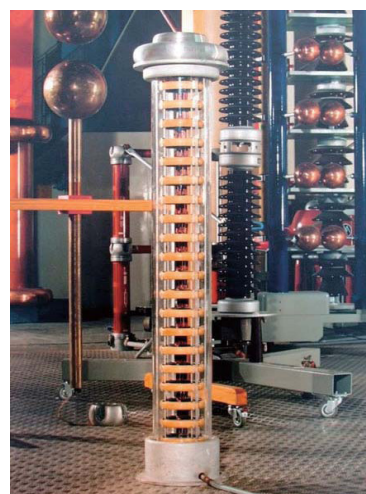


Fig. 1 Outer View of Conventional Damped-Capacitor Divider

(3) 新しい高圧部形状 筆者らの考えは低耐圧 (4kV) のキャパシタを大規模直列接続 (massive series-connection) しながらも、網目状に接続することにより、残留インダクタンスを軽減することにある。図 2 はその概念図を描いたものである。高圧部端部から 2 組の直列接続された C-R 要素が高圧部絶縁円筒に絡み付くように互いに反対回りに巻き付けられる。

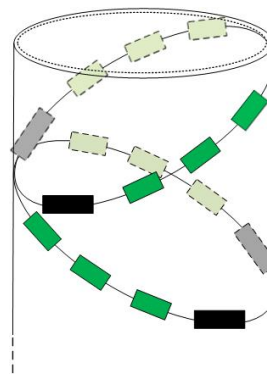


Fig. 2 Arrangement of C-R segments

Ayrton-Perry 巻きと異なるのは、半周毎に並列接続する点にある。この接続により、残留インダクタンスは Ayrton-Perry 巻きの場合より小さくなるのみならず、上下に隣り合う C-R 要素は磁束を打ち消し合う。

大規模直列接続を行うことにより、高圧部カラムに沿っての電圧分担は一樣となる利点も生まれる。

欠点と言えば、C-R 要素を絡み付くように巻く必要性から高圧部絶縁円筒の径を小さくできないので、低圧分圧器では不必要に太くなることくらいである。このような考えに基づいて製作されたのが図 3 に示す新しい分圧器である。写真から容易に判るように、内部アクリル円筒に巻き付けられた大規模直列接続キャパシタ及び高圧部円板電極よりなる主要部は更にアクリル円筒容器の中に収納される構造となっている。



Fig. 3 High-Voltage Arm Structure of Proposed Divider

(4) 単位ステップ応答特性及び雷インパルス応答 前項まで述べた考え方により、新しい分圧器を試作し、ステップ応答を測定し、標準雷インパルス応答を計算 (3) した。例として 0.84/60 impulse の応答計算を図 4 に示す。

分圧器の最小 C-R 単位は  $3.9\text{nF} \times 3$  直列+ $50\Omega$  である。高圧部はこの基本要素を 2 並列 28 段 (図 2, 3 参照) で構成されている。この結果、分圧器の最高測定電圧は  $4\text{kV} \times 3$  直列  $\times 28$  段 =  $336\text{kV}$  となっている。

$$t_s = 81.2 \text{ ns}$$

計算された標準雷インパルス応答から、波頭長誤差 ( $\Delta T1$ ) 及びピーク値誤差 ( $\Delta U$ ) を評価することができる。これらの数値をまとめたものを表 1 に示す。

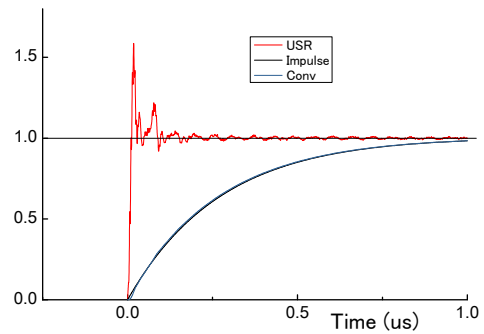


Fig. 4 Measured USR and Impulse Response with 0.84/60 impulse:  $T_N = -3.1\text{ns}$ ,  $T_a = 6.5\text{ns}$ ,

Table 1 Evaluated L.I. Response Parameter Errors

| L. Impulses | $\Delta T1$ (%) | $\Delta U$ (%) |
|-------------|-----------------|----------------|
| 0.84/60     | -0.170          | 0.052          |
| 1.20/50     | -0.070          | 0.037          |
| 1.56/60     | +0.188          | 0.074          |

表から確認できるように、今回試作した制動容量型インパルス電圧波形測定用分圧器は波頭長誤差で 0.2% 以内、ピーク値誤差で 0.08% 以内であり、驚異的高性能の分圧器であることを確認した。実際、0.2% 誤差は殆ど測定限界に近く、これ以上高性能の分圧器を製作したとしても、現在の技術では評価する方法がない。

(5) まとめ 新しい考えに基づく高圧部を有する制動容量型分圧器の製作を行い、その性能評価及び耐圧試験を行った。性能を評価するため単位ステップ応答を測定し、その結果から雷インパルス応答を計算したが、波頭長誤差で 0.2% 以内、ピーク値誤差では 0.08% 以内という高性能を得た。

従来型の制動容量型分圧器では数十 kV 耐圧のキャパシタが必要であったが、今回提案した構造にすることによりそのような特別なキャパシタを準備する必要がなくなった。

また、大規模直列接続を行うことで、高圧部の残留インダクタンスを構造的に減少させることが可能となった。

#### <引用文献>

- (1) 里, 東部, 西村, 清水, 岡本: 「プロトタイプ 320kV 制動容量型分圧器の耐圧試験」, 平成 26 年電気学会全国大会, No. 7-067
- (2) K. Schon : "Stoßspannungs- und Stoßstrommesstechnik", Springer, p.157, 2010
- (3) 里, 加藤, 原田, 脇本, 佐伯, 坂口, 飯田: 「雷インパルス測定システム解析のための数値コンボリューション」, 電気学会論文誌 A, Vol.120-A, No.12, pp.1081-1088, 2000 年 12 月

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- (1) Yoshifumi Okamoto, Shinji Wakao, and Shuji Sato, "Topology Optimization Based on Regularized Level Set Function for Solving 3-D Nonlinear Magnetic Field System with Spatial Symmetric Condition," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 52, No. 3-7402204 (2016) 査読有り
- (2) 圓谷友紀, 岡本吉史, 里周二:「辺有限要素法による電磁界解析におけるブロックマルチカラーオーダーリングを援用した並列化前処理付き MRTR 法に基づく線形方程式求解の高速化」, 電気学会論文誌 A, Vol. 136, No. 7, pp. 395-403 (2016) 査読有り

[学会発表] (計 26 件)

- (1) 里周二, 東部 真季 (宇都宮大学), 西村 誠介, 清水 博幸(日本工業大学), 岡本吉史 (法政大学), 池田 久利 (東京大学):「IEC 61082-4 TDG 遮断電流波形決同定のためのパラメータ初期値の新しい決定方法」, 平成 28 年電気学会全国大会予稿集, Vol. 6, No. 4, pp. 4-5, 2016 年 3 月 (東北大学, 仙台市) 査読有り
- (2) 里周二, 東部 真季 (宇都宮大学), 西村 誠介, 清水 博幸(日本工業大学), 岡本吉史 (法政大学):「インパルス電圧発生回路発生波形の解析解の自動計算方法について」, 平成 28 年電気学会全国大会予稿集, Vol. 7, No. 89, pp. 136-137, 2016 年 3 月 7-089 (東北大学, 仙台市) 査読有り
- (3) 里周二, 東部 真季 (宇都宮大学), 西村 誠介, 清水 博幸(日本工業大学), 岡本吉史 (法政大学):「インパルス電圧波形測定用新型制動容量型分圧器の試作」, 平成 28 年電気学会全国大会予稿集, Vol. 7, No. 90, pp. 138-139, 2016 年 3 月 (東北大学, 仙台市) 査読有り
- (4) S. Sato, S. Nishimura and H. Shimizu: "Determination of Waveform Parameters for Short-Time a.c. Voltage and Current Generated by IEC 61083-4 TDG", Proc. of IEEE Southern Power Electronics Conference, S6, No. 459 (CD-ROM), December 2016, Auckland, New Zealand. 査読有り
- (5) S. Sato: "Development of High

Voltage Divider for Reference Measuring System", 4th Joint Research Workshop in Petroleum Institute, February, 2017, Abu-Dhabi, United Arab Emirates 査読なし

- (6) 里周二(宇都宮大学), 西村 誠介, 清水 博幸(日本工業大学):「長い測定ケーブルを使って雷インパルス電圧波形を測定した場合の試験電圧関数が波頭長に及ぼす影響について」, 平成 29 年電気学会全国大会予稿集, Vol. 7, No. 75, pp. 113-114, 2017 年 3 月 (富山大学, 富山市) 査読有り
- (7) 橋本 浩輔, 齊藤 拓也, 加藤 正平(東洋大学), 里周二(宇都宮大学):「空芯型共振変圧器(テスラコイル)の動作解析」, 平成 29 年電気学会全国大会予稿集, Vol. 7, No. 76, pp. 115-116, 2017 年 3 月 (富山大学, 富山市) 査読有り
- (8) Reona Hoshino, Yoshifumi Okamoto, and Shinji Wakao, "Topology Optimization of Magnetic Shield Using Level-set Function Combined with Element-based Topological Derivative," *Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Workshop on Optimization and Inverse Problems in Electromagnetism*, pp. 66-67, OIPE 2016, Roma Tre University, Rome, Italy, 2016 年 9 月 13~15 日 査読有り
- (9) Yoshifumi Okamoto, Reona Hoshino, and Shinji Wakao, "Enhancement of Topology Optimization Based on Level-set-function in Magnetic Field System," *Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Workshop on Optimization and Inverse Problems in Electromagnetism*, pp. 89-90, OIPE 2016, Roma Tre University, Rome, Italy, 2016 年 9 月 13~15 日 査読有り
- (10) Yoshifumi Okamoto, Reona Hoshino, and Shinji Wakao, "Level-set-function-based Topology Optimization Supported by the Method of Moving Asymptotes in a Magnetic Field Problem," *Proceedings of the 17<sup>th</sup> Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, TO101, CEFC 2016, Miami, U.S.A., 2016 年 11 月 13~16 日 査読有り
- (11) Kazuki Hirono, Reona Hoshino, Shinji Wakao, Yoshifumi Okamoto, and W. Jeon, "Multi-objective Design Optimization of Primary Core in Induction Heating Rolle by Leve-set Method," *Proceedings of the 17<sup>th</sup> Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, TP082, CEFC 2016,

- Miami, U.S.A., 2016年11月13~16日 査読有り
- (12) Tomonori Tsuburaya, Yoshifumi Okamoto, and Zhiqi Meng, "Parallelization Performance of Robust Incomplete Factorization Preconditioner for Real Symmetric Linear Systems Arising in Magnetic Field Analyses," *Proceedings of the 17<sup>th</sup> Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, WP031, CEFC 2016, Miami, U.S.A., 2016年11月13~16日 査読有り
- (13) Hiroyuki Kuwahara, Yuya Maruyama, Shinji Wakao, Masahide Takahashi, Makoto Yagi, Tamio Okutani, and Yoshifumi Okamoto, "Multi-objective Optimization of Magnetic Sensor with Conductor Plate for Rail Wheel Detection," *Proceedings of the 17<sup>th</sup> Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, WP041, CEFC 2016, Miami, U.S.A., 2016年11月13~16日 査読有り
- (14) 星野玲央奈, 神谷剛志, 若尾真治, 岡本吉史:「空孔感度を導入したレベルセット法による磁気シールドのトポロジー最適化」, 平成28年電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-16-082, RM-16-128, pp. 149-154, 2016年9月8日(石垣島商工会館) 査読有り
- (15) 岡本吉史, 増田弘, 星野玲央奈, 若尾真治:「MMAによるレベルセット関数に基づく磁界問題トポロジー最適化手法の収束特性改善」, 平成28年電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-16-083, RM-16-129, pp. 155-160, 2016年9月8日(石垣島商工会館) 査読有り
- (16) 廣野数樹, 星野玲央奈, 若尾真治, 岡本吉史, 田宇鎮:「三次元磁界一熱連成FEM解析と二次元レベルセット法の併用による誘導加熱ローラの一次側鉄心設計に関する検討」, 平成28年電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-16-085, RM-16-131, pp. 165-170, 2016年9月8日(石垣島商工会館) 査読有り
- (17) 圓谷友紀, 岡本吉史:「周波数領域有限要素法を用いた共振器電磁界解析に対する前処理付き線形方程式解法の性能—各種前処理の特性と並列化による高速化—」, 平成28年電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-16-104, RM-16-150, pp. 265-270, 2016年9月9日(石垣島商工会館) 査読有り
- (18) 岡本吉史, 増田弘, 神田雄太郎, 星野玲央奈, 若尾真治:「MMAによる三次元非線形磁界問題のトポロジー最適化」, 第12回最適化シンポジウム(OPTIS2016), No.2206, 2016年12月7日(北海道大学) 査読有り
- (19) 増田弘, 神田雄太郎, 岡本吉史, 星野玲央奈, 若尾真治:「二次元電磁界システムにおける特性関数が収束解に与える影響の検討」, 平成28年電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-17-005, RM-17-005, pp. 17-22, 2017年1月18日(法政大学, 東京都) 査読有り
- (20) 星野玲央奈, 廣野数樹, 神谷剛志, 若尾真治, 岡本吉史:「磁気シールドのトポロジー最適化を対象としたレベルセット法における各種空孔生成方法の比較検討」, 平成28年電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-17-014, RM-17-014, pp. 69-74, 2017年1月18日(法政大学, 東京都) 査読有り
- (21) 宮田海志, 山浦伶尉, 関口広太, 岡本吉史:「Chua型モデルに基づく磁気ヒステリシスを考慮した非線形磁気回路法の基礎検討」, 平成29年電気学会全国大会, 111-A3セッション:静止器解析(I), 5-064, Vol. 5, p. 111, 2017年3月15日(富山大学, 富山市) 査読有り
- (22) 柿田晋平, 原田郁生, 岡本吉史, 圓谷友紀:「オーバーラップ要素を考慮した領域分割に基づく二次元並列有限要素法の基礎検討」, 平成29年電気学会全国大会, 111-A3セッション:静止器解析(I), 5-071, Vol. 5, p. 120, 2017年3月15日(富山大学, 富山市) 査読有り
- (23) 圓谷友紀, 岡本吉史, 孟志奇:「辺有限要素解析から得られる線形方程式における高次のフィルインを導入したブロックIC前処理に関する検討」, 平成29年電気学会全国大会, 111-A3セッション:静止器解析(I), 5-072, Vol. 5, p. 121, 2017年3月15日(富山大学, 富山市)
- (24) 神田雄太郎, 増田弘, 岡本吉史, 若尾真治:「3Dプリンタによるトポロジー最適化結果の三次元成形と形状スムージングに関する検討」, 平成29年電気学会全国大会, 111-A3セッション:静止器解析(I), 5-073, Vol. 5, p. 122, 2017年3月15日(富山大学, 富山市) 査読有り
- (25) 並木聡史, 小澤隆史, 岡本吉史:「ステラファン型共振器の電磁波解析におけるファンの回転角が誘電損失へ与える影響の検討」, 平成29年電気学会全国大会,



111-A4 セッション：静止器 解析 (II), 5-077, Vol. 5, p. 128, 2017年3月15日 (富山大学, 富山市) 査読有り

- (26) 増田弘, 神田雄太郎, 岡本吉史, 廣野数樹, 星野玲央奈, 若尾真治, 圓谷友紀:  
「へビサイド関数を用いた二次元軸対称電磁界における誘導加熱装置のトポロジー最適化」, 平成29年電気学会全国大会,  
111-A3 セッション：静止器 解析 (II), 5-078, Vol. 5, p. 129, 2017年3月15日 (富山大学, 富山市) 査読有り

[図書] (計 1件)

里周二(委員長), 他19名: JIS C 61083-2:2016  
インパルス電圧及び電流試験に用いるソフトウェアに関する要求事項, 日本規格協会, 平成28年9月20日

[産業財産権]

名称：該当なし  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等  
余白 ( )

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

里周二 (SATO Shuji )  
宇都宮大学・名誉教授  
研究者番号：10215759

### (2) 研究分担者

岡本吉史 (Okamoto Yoshifumi)  
法政大学・理工学部・准教授  
研究者番号：40415112

### (3) 連携研究者

余白 ( )

研究者番号：

### (4) 研究協力者

余白 ( )